

地上デジタルテレビ放送波を用いた パッシブレーダの実証検討

諏訪 啓*
中村聖平*
森田晋一*

An Experimental Study on Digital TV Based Passive Bistatic Radar

Kei Suwa, Shohei Nakamura, Shinichi Morita

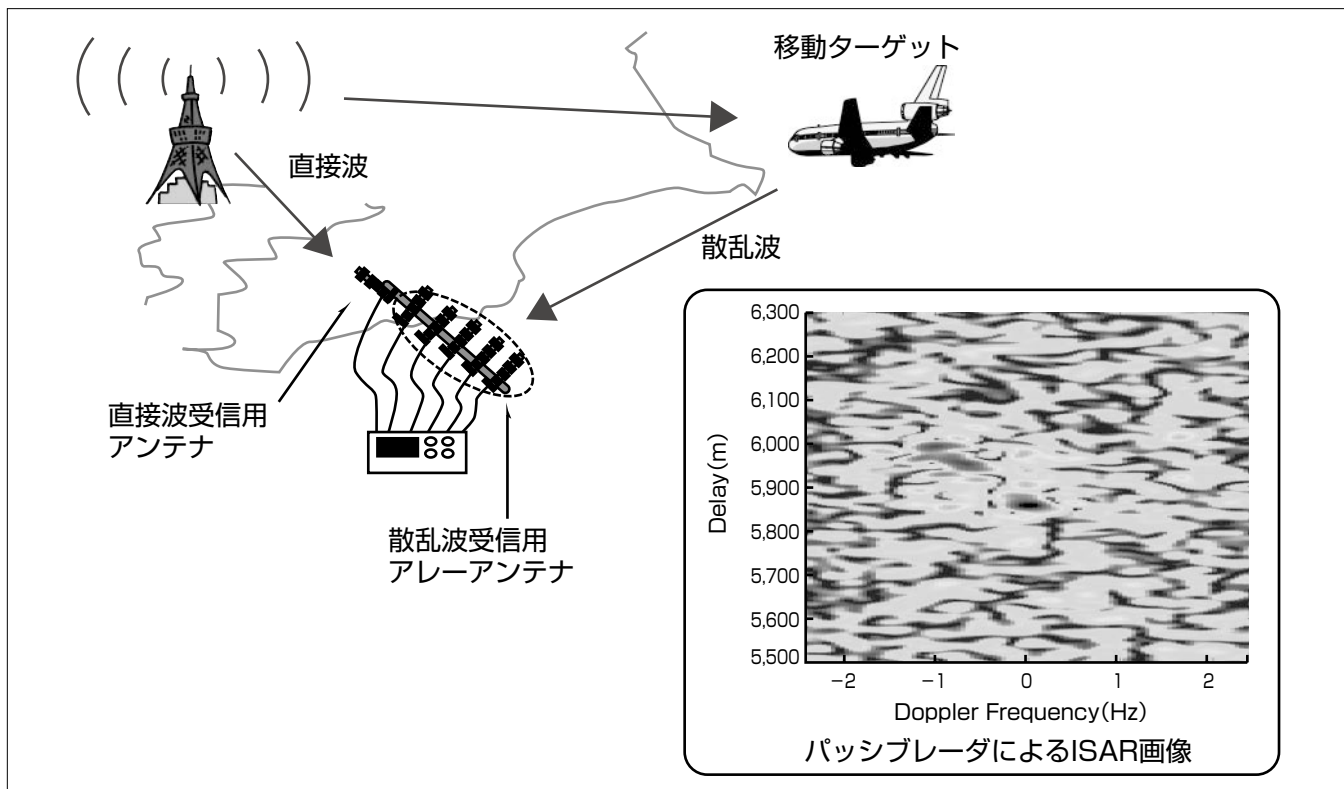
要 旨

パッシブレーダは、放送局など既存の電波源からの送信電波を利用してターゲットの距離と移動速度を計測する技術である。パッシブレーダ技術の歴史は古く、50年以上さかのぼることができるが、実用化された例は極めて少ない。放送局の送信電力程度では、観測できる覆域が限られてしまうことや、十分な距離分解能を達成できる程度の帯域幅を持った放送信号がほとんど存在しなかったことなどが主たる原因である。ところが、大電力の電波を放射する今日の一般的なレーダと違い、パッシブレーダは自ら電波を放射しないため、省電力・省電波資源に資する技術として近年改めて注目を集めている。

近年普及の進んでいる地上デジタルテレビ放送は、その信号帯域幅が比較的広いこと、また、中継局が各地に配置されていることから、分解能と覆域を確保できる電波源と

して期待できる。そこで、三菱電機では、地上デジタル放送波を用いたパッシブレーダの実証実験を実施している。

本稿では、2009年度に羽田空港周辺で実施したフィールド実験について述べる。この実験では、電波源として東京タワーから送信される地上デジタルテレビ放送波を用い、空港近傍を飛行する旅客機をターゲットとする観測を実施した。旅客機の位置と速度を計測するのみならず、ターゲットにおける電波の反射強度の二次元分布を画像のように観測できる逆合成開口レーダ(Inverse Synthetic Aperture Radar : ISAR)と呼ばれる技術を応用して、分解能8 m程度の旅客機のレーダ画像(以下“ISAR画像”という。)を観測することに成功し、ターゲットのサイズを大まかに把握できることを示した。



パッシブレーダの概念図とパッシブレーダによるISAR画像の例

右下は、2009年度の実証実験で観測されたボーイング777型旅客機のISAR画像である。これまで、パッシブレーダを用いたISAR画像の観測結果が報告された例はなかった。まだ、航空機の形状を認識できるレベルには至らないが、サイズをおおむね推定することが可能になった。

1. ま え が き

パッシブレーダは、放送局など既存の電波源からの送信電波を利用してターゲットの距離と移動速度を計測する技術である(図1)。大電力の電波を放射する今日の一般的なレーダと違い、パッシブレーダは自ら電波を放射しないため、省電力・省電波資源に資する技術として近年改めて注目を集めている。

近年普及の進んでいる地上デジタルテレビ放送は、その信号帯域幅が比較的広いこと、また、中継局が各地に配置されていることから、分解能と覆域を確保できる電波源として期待できる。地上デジタルテレビ放送の信号帯域幅は、1チャンネルあたり約6MHzなので、1チャンネル分で約50mの距離分解能が得られる。さらに、例えば東京タワーであれば、9チャンネル分の信号を放送しているため、これらを合成して約54MHzの帯域幅を利用できる。54MHzの帯域幅は約5.6mの距離分解能に相当するため、ターゲットの位置だけではなく、サイズを計測することも可能になる。よって、ターゲットにおける電波の反射強度の二次元分布を画像のように観測できる逆合成開口レーダ(ISAR)と呼ばれる技術と組み合わせれば、ターゲットの粗いISAR画像を観測できるようになり、パッシブレーダによるターゲット識別の可能性も期待できる。パッシブ

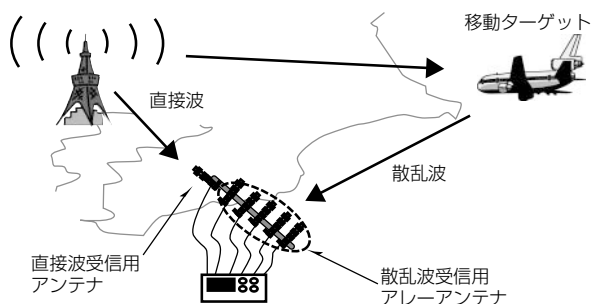


図1. パッシブレーダの観測のジオメトリ

レーダによるISAR方式については、いくつかの理論検討結果が報告されているが⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾、筆者らの知る限り、実データによる検証結果はこれまでに報告されていない。

本稿では、まず、パッシブレーダ方式について簡単に解説を加え、2009年に羽田空港周辺で実施したフィールド実験の内容とその結果について述べる。

2. 地上デジタル放送を用いたパッシブレーダ

2.1 パッシブレーダの基本原則

パッシブレーダは、放送局から直接到来する直接波と、ターゲットで散乱してから到来する散乱波を受信する(図1)。図2に示すように、散乱波は直接波と基本的に波形は同じだが、信号強度が小さく、また、経路長差の分だけ到来時刻が遅延する。さらに、散乱波の中心周波数は、ターゲットの運動に起因するドップラー周波数の分だけシフトする(走行する救急車のサイレンの音程が変化して聞こえるのと同じ現象)。

パッシブレーダでは、直接波と散乱波の信号波形の相関処理によって、経路長差とドップラー周波数を計測する。具体的には、直接波の信号波形の遅延量と中心周波数を様々にシフトさせながら、散乱波の波形との相関を計算する。相関処理結果(図2右端)のピーク位置から、直接波と散乱波の経路長差及び散乱波のドップラー周波数を計測できる。なお、経路長差の計測結果から、ターゲットは放送局とパッシブレーダの受信機を焦点とする楕円(だえん)体面上にあることは分かるが、位置を一意に決定することはできない。そこで、アレー状に並べたアンテナを用いて、散乱波の到来方向を推定することによって、最終的にターゲットの位置を評定する⁽⁴⁾。

2.2 パッシブレーダを用いたISAR方式

パッシブレーダの観測量は経路長差とドップラー周波数であるが、ターゲットのサイズに対して十分に高い分解能で観測すると、経路長差とドップラー周波数を縦横の軸として、ターゲットにおける電波の反射強度の二次元分布の

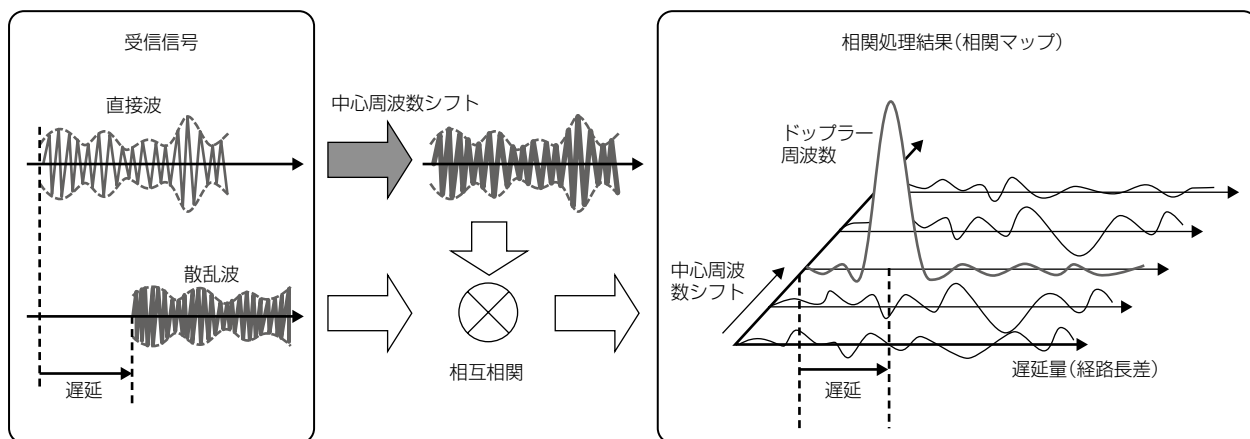


図2. パッシブレーダの観測信号と相関処理結果の概念図

マップを観測できる(これが画像のように見えるので、一般にレーダ画像又はISAR画像などと呼ばれる)。パッシブレーダにおける距離の分解能 Δd とドップラー周の分解能 Δf は、それぞれ次式で与えられる。

$$\Delta d = \frac{c}{B}, \Delta f = \frac{1}{T} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 c は光速、 B は信号帯域幅、 T は観測時間である。例えば、地上デジタル放送の9チャンネル分の帯域幅54MHzで10秒間観測すると、経路長差の分解能は約5.6m、ドップラー周波数分解能は0.1Hzである。なお、詳細な議論は文献(4)などにゆずるが、ドップラー周波数の分解能をサイズに換算する場合は、大まかに $\lambda R/2v$ (λ :波長、 R :ターゲットまでの距離、 v :ターゲットの速度の視線方向に直交する成分)を掛ければよい。例えば、中心周波数530MHzの信号を用いるとして、20km先を300km/hで飛行する航空機を観測する場合、ドップラー周波数分解能0.1Hzは約7mの分解能に相当する。旅客機の大きさは30~70m程度であるから、この程度の分解能で観測できれば、機種の識別がある程度可能であると期待される。

このように、長時間の観測を行うことでドップラー周波数の分解能を向上できるが、その間に航空機はどんどん動いてしまう。ISAR技術の根幹はこの動きを推定して補償することによって長時間観測した信号の処理を可能にする点である⁽⁵⁾。

3. 実証実験

3.1 実験方法

東京タワーから送信された地上デジタルテレビ放送波を用いて、羽田空港発着の旅客機を観測ターゲットとしたフィールド実験を実施した。観測のジオメトリを図3に示す。パッシブレーダの受信装置は、東京タワーから約10.5km離れた葛西臨海公園の展望広場に設置した。また、直接波受信用に、八木・宇田アンテナを東京タワーに向けて設置し、散乱波受信用には、方位角約200°に向けた八木・宇田アンテナのアレーを配置した。

この実験では、旅客機の位置評定とISAR画像の観測を実施した。表1に実験時の観測パラメータを示す。実験では地上デジタルテレビ放送波における物理チャンネル21chから26chまでの帯域幅約36MHzの信号を用いており、距離分解能(散乱波と直接波の経路長差の分解能)は約8mである。また、位置評定には観測時間80ms、ISAR画像観測には観測時間5sとした。ドップラー周波数分解能はそれぞれ、12.5Hz、0.2Hzである。

3.2 実験結果

図4に、観測された地上デジタルテレビ放送の信号スペクトルを示す。横軸が周波数、縦軸が強度である。1チャンネル6MHzの信号が複数近接して並んでいることが確

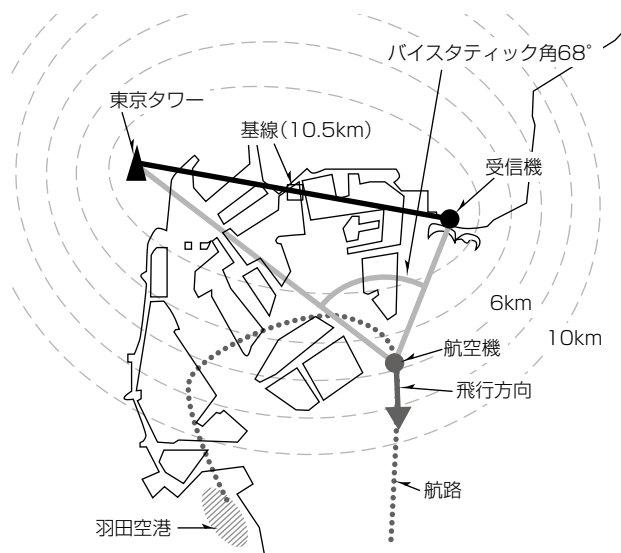


図3. 観測のジオメトリ

表1. 観測パラメータ

パラメータ	設定値
周波数帯域(21~26ch)	518~554MHz
送信局等価輻射(ふくしゃ)電力	48kW
直接波経路長	10.5km
受信アンテナゲイン	10.65dB
A/Dサンプリング周波数	100MHz
観測時間	80ms, 5s

認できる。この実験で使用した帯域は、破線で囲まれた領域に相当する。図5は、観測された直接波と散乱波の相関処理の結果得られた相関マップであり、縦軸が直接波と散乱波の経路長差(遅延量)、横軸がドップラー周波数である。ドップラー周波数ゼロに観測される強いピークは、地表面の固定物からの反射である。経路長差4.75km、ドップラー周波数12.5Hzに観測されるピークが、旅客機からの散乱信号に相当する。この信号を取り出して、MUSIC(Multi-Ple Signal Classification)法と呼ばれるアレー信号処理によって散乱波の到来角を推定した結果を図6に示す。図6のピーク位置から得られる到来角の計測値は方位角219.7°であるが、これを、国土交通省の“羽田空港飛行コースホームページ⁽⁶⁾”で公開されている情報を参考に割り出した旅客機の位置と比較すると、誤差約1°であった。

図7に、5秒間の観測で得られた旅客機のISAR画像を示す。同図の縦軸は経路長差(遅延量)、横軸はドップラー周波数である。このとき、ターゲットは羽田空港離陸のボーイング777-300型機であった。図7から、観測したターゲットはレンジ方向に約120m、ドップラー方向に約1.2Hz程度の広がりを持つことが確認できる。ここで、散乱波受信用アンテナの指向方向とターゲットの観測位置から、ターゲットのバイスタティック角は約68°であった(図3参照)。したがって、経路長差120mから推定されるターゲットサイズは概算で約73(=120/(2cos(68/2)))mである。実

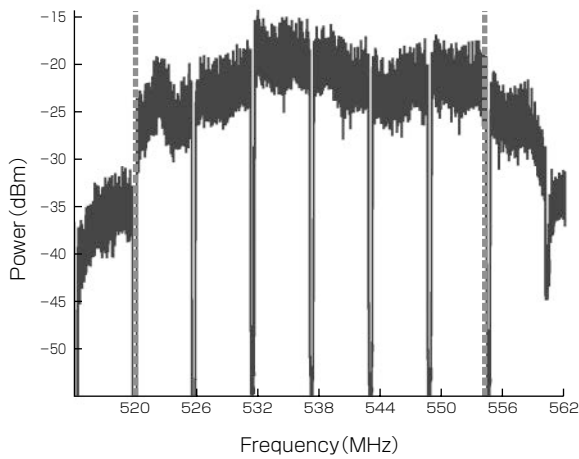


図4. 地上デジタルテレビ放送の信号スペクトル

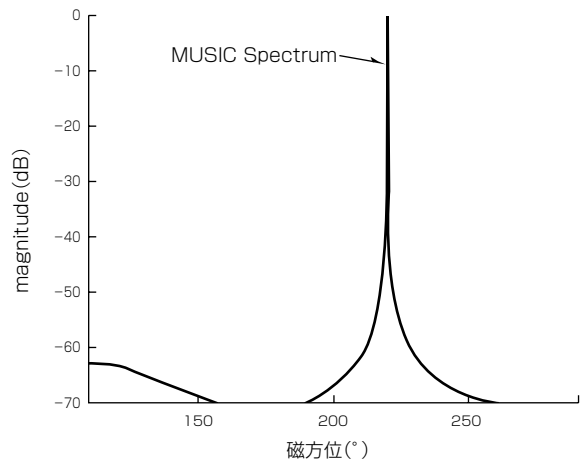


図6. アレー信号処理による到来角推定結果

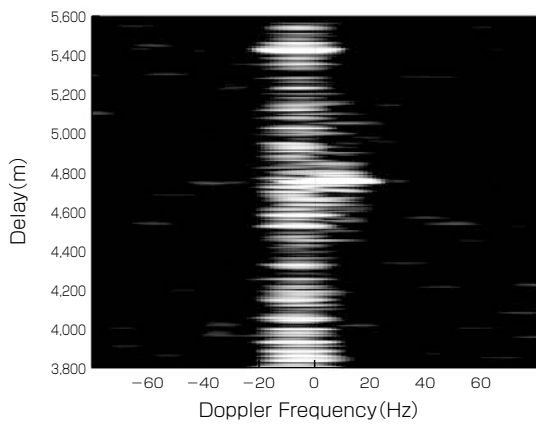


図5. 相関マップ

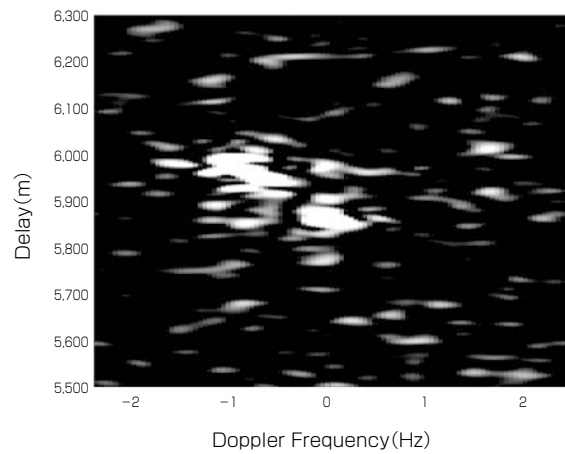


図7. ボーイング777-300型機のISAR画像

実際のボーイング777-300型機は、全長73.9m、全幅60.9mであるので、この結果は妥当な値である。

4. むすび

地上デジタルテレビ放送波を用いたパッシブレーダの実証実験結果について述べた。この実証実験では、羽田空港近傍を飛行する旅客機の位置評定に加え、旅客機のISAR画像の観測に成功した。まだ、航空機の形状を認識できるレベルには至らないが、サイズをおおむね推定することが可能であることが確認できた。

今後は、実用化に向けて、より遠方のターゲットの検出と位置評定及びISAR画像の観測を実現するための方式開発と実証実験を継続する予定である。

参考文献

- (1) Willis, N. J., et al.: Advances in Bistatic Radar, Scitech publishing Inc. (2007)
- (2) Cetin, M., et al.: Region-Enhanced Passive Radar Imaging, IEE Proceedings. Radar, Sonar and Navigation, **152**, No.3, 185~194 (2005)
- (3) Wu, Y., et al.: Wide-angle ISAR passive imaging using smoothed pseudo Wigner-Ville distribution, Proc. IEEE Radar Conf., 2001. 363~368 (2001)
- (4) 藤坂貴彦, ほか: 目標の回転と直進を利用する二次元クロスレンジ圧縮逆合成開口レーダ, 電子情報通信学会論文誌, **J.81-B-II**, No.3, 226~233 (1998)
- (5) 山本和彦, ほか: ラジアル速度が異なる複数の目標のISAR画像再生アルゴリズム, 電子情報通信学会論文誌, **J.85-B**, No.5, 829~838 (2002)
- (6) 国土交通省: 羽田空港飛行コースホームページ(2005) <https://www.franomo.mlit.go.jp/>